مجلّه‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره‌ی دوازدهم، بهار و تابستان ۱۳۸۸

دورنمایی از وضعیّت خشکسالی ایران طیّ سی سال آینده

لیلی خزانه داری(کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی بلایای جوی، نویسنده مسؤول)
Lk۱۴۲@yahoo. com
فاطمه زابل عباسی(کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی کاربردی)
abbasi ۹۹۹۹ @ yahoo. com
شهرزاد قندهاری(کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی بلایای جوی)
Sh. ghand hari @ gmail. com
منصوره کوهی(کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی کاربردی)
Man_ koohi@ yahoo. com
شراره ملبوسی(کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی تغییراقلیم)

چکیده

پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم، به ویژه در اثر افزایش گازهای گلخانه ای، طیّ سال‌های اخیر مشکلات زیادی را همراه داشته که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بخش‌های مختلف جامعه را تحت تأثیر قرار داده است. یکی از مهمترین این پیامدها افزایش وقوع بلایای جوّی-اقلیمی نظیر سیل، خشکسالی، چرخندهای حارّه‌ای، بالا آمدن سطح آب دریا، توفان گرد و غبار و ... است، که شایع‌ترین آنها در ایران وقوع سیل و خشکسالی است. با توجه به موقعیّت جغرافیایی ایران و سیستم های سینوپتیکی که این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، آشکار است که خشکی از جمله ویژگی‌های این منطقه به حساب می‌آید و خشکسالی یکی از مهمترین و شایع ترین بلایای جوی-اقلیمی است که این کشور را متأثر می سازد. از آن جا که خشکسالی، بخش های مختلف جامعه مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت، اقتصاد، بهداشت و ... را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا پایش و ارزشیابی این بلیه در آینده به منظور ارایه‌ی برنامه ریزی صحیح در بخش‌های مختلف جامعه، امری لازم و ضروری است. برای دست‌یابی به این هدف، ابتدا باید داده های اقلیمی برای دوره های آتی شبیه سازی شوند. برای این منظور یکی از مناسب ترین روش ها، استفاده از خروجی الگوهای جفت شده جو-اقیانوس گردش عمومی جو (AOGCM)[۱] است. لذا، در این نوشتار ابتدا با استفاده از خروجی های الگوی GCM و

۱. Atmospheric-Ocean General Circulation Model

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۹ تاریخ تصویب:۸۸/۹/۱۲

ریز گردانی [1] آنها به کمک الگوی LARS–WG، داده های بارش طیّ دوره ۳۹–۲۰۱۰ شبیه سازی شده است. سپس با استفاده از این داده ها وضعیّت خشکسالی کشور به کمک دو شاخص دهک (DI) [2] و استاندارد بارش (SPI) [3] طیّ این دوره مورد بررسی و ارزشیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق ضمن تأیید هم‌خوانی این دو شاخص جهت بررسی وضعیّت خشکسالی در کشور، نشان داده است که طیّ سی سال آینده شرایط خشکسالی در کشور رو به افزایش خواهد بود که این مسأله وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید می کند، به گونه‌ای که طیّ دوره مورد مطالعه، در سال های ۲۰۱۱، ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۴، ۲۰۳۵ و ۲۰۳۹ بیشتر نقاط کشور با خشکسالی شدید و بسیار شدید روبرو خواهد بود که در این میان، وضعیّت خشکسالی در سال ۲۰۳۹ به مراتب بحرانی تر خواهد بود.
کلّید واژه‌ها: الگو های گردش عمومی جو، ریز گردانی، LARS–WG، خشکسالی، شاخص دهک، شاخص SPI.

درآمد

به منظور بررسی اثرات آتی تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف نظیر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد، ابتدا باید متغیّرهای اقلیمی تحت تأثیر تنش های ناشی از گازهای گلخانه ای شبیه سازی شوند. معتبرترین ابزار موجود جهت شبیه سازی داده های اقلیمی برای دوره های آتی، استفاده از خروجی الگوهای جفت شده جو–اقیانوس گردش عمومی جو است (شاه کرمی و مساح بوانی، ۱:۱۳۸۵). یکی از ضعف های اصلی الگوهای GCM، بزرگ مقیاس بودن مکانی متغیّرهای اقلیمی شبیه سازی شده (در حدود پنجاه‌هزار کیلومتر مربع) است که با توجه به تغییرات اقلیمی و توپوگرافی این نتایج مستقیماً در مقیاس ایستگاهی قابل استفاده نیستند. بنابراین لازم است تا خروجی این الگوها، به روش های مختلف در مقیاس ایستگاهی و منطقه ای کوچک مقیاس شوند. ریز گردانی داده ها به دو روش آماری و دینامیکی امکان پذیر است (بابائیان و نجفی نیک، ۴۷:۱۳۸۴).

از جمله مطالعاتی که در زمینه‌ی الگوسازی اقلیمی مناطق مختلف جهان با استفاده از الگوهای آماری انجام شده است، می توان به پژوهش تامسون و مالان [4] (۱۹۹۵) در زمینه‌ی الگوسازی سی سال اقلیم ایستگاه های

---

۱. Downscaling
۲. Decile Index
۳. Standard Precipitation Index
٤. Thompson & Mullan

هواشناسی در نیوزلند اشاره کرد (تامسون و مالان، ۱۱۵:۱۹۹۵). جانسون[1] و همکاران (۱۹۹۶) نیز دو الگوی مختلف تولید داده های هواشناسی با عناوین USCLIMATE و CLIGEN را مورد بررسی قرار دادند (جانسون و همکاران، ۱۸۷۸:۱۹۹۶). ویلکس[2] و همکاران (۱۹۹۲ و ۱۹۹۹) روشی را برای کاربرد سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از الگوی WGEN که یک الگوی مولّد داده های هواشناسی است، ابداع کردند. این الگو برای تولید مقادیر روزانه دمای بیشینه و کمینه‌ی بارندگی و تابش روزانه مناسب است (ویلکس، ۶۷:۱۹۹۲ و ویلکس و ویلبی[3]، ۳۲۹:۱۹۹۹). مک کاگ[4] و همکاران (۲۰۰۳) توان‌مندی الگوی CLIMGEN را جهت شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های انتاریوی[5] جنوبی در کانادا مطالعه کردند (مک کاگ و همکاران، ۱۲۸:۲۰۰۳). در مطالعه ای که توسط دوبروسکی[6] در جمهوری چک انجام شد، الگوی MET& ROLL مورد ارزشیابی قرار گرفت. به کمک این الگو داده های دمای بیشینه و کمینه‌ی تابش خورشید و بارش روی ایستگاه‌های هواشناسی الگوسازی شد (دوبروسکی، ۹۷:۱۹۹۶ و دوبروسکی، ۱۲:۱۹۹۶). زمنف و بروکس[7] (۱۹۹۹) شبیه سازی داده ها را با استفاده از الگوی LARS-WG در انگلستان مورد مطالعه قرار دادند (زمنف و بروکس، ۱۳۷:۱۹۹۹). بابائیان و همکاران (۲۰۰۴) نیز تغییرات اقلیمی کره جنوبی را به کمک این الگو طیّ دوره ۲۰۱۰–۲۰۳۹ بررسی کردند (بابائیان و همکاران، ۹۸:۲۰۰۴). در ایران نیز بابائیان و همکاران این الگو را روی برخی از ایستگاه های هواشناسی استان خراسان مورد ارزشیابی قرار دادند (بابائیان و نجفی نیک، ۴۷:۱۳۸۴).

کاربرد داده‌های بارش شبیه‌سازی شده به روش‌های متفاوت، در پژوهش‌های مختلفی ارایه شده است. یکی از کاربردهای مهم و بسیار سودمند این داده‌ها، استفاده از آنها جهت پایش و ارزشیابی خشکسالی است. به عنوان مثال، صمدی نقاب (۱۳۸۵) داده‌های بارش حاصل از سناریوی IS۹۲a و الگوی GCM مرکز CISRO(IS۹۲a) استرالیا را به روش رگرسیون یک متغیّره و پارامترهای بدون بعد ریزگردانی کرد. سپس، با استفاده از داده‌های ریزگردانی شده و نیز داده های دیدبانی شده برای یک دوره آماری سی ساله، شاخص استاندارد بارش را برای ماه های مارس، آوریل، می و ژوئن با هر دو نوع داده محاسبه نمود. نتایج وی نشان داد

---

۱. Johnson
۲. Wilks
۳. Wilby
۴. MC. Kague
۵. Ontario
۶. Dubrovsky
۷. Semenev & Brooks

که با استفاده از این روش می‌توان از این شاخص، که تاکنون تنها جهت پایش خشکسالی در گذشته استفاده شده است، به عنوان ابزاری جهت پیش بینی‌های آینده استفاده کرد (صمدی نقاب، ۱۹۳:۱۳۸۵). در تحقیق دیگر، مساح بوانی و مرید (۱۳۸۴) اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و کشاورزی حوضه‌ی زاینده رود اصفهان را به کمک داده های الگو گردش عمومی HadCM۳ طیّ دو دوره ۳۹-۲۰۱۰ و ۹۹-۲۰۷۰ مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل اطلاعات، کاهش بارندگی، افزایش دما و افزایش سال‌های خشک متوالی را تا سال ۲۱۰۰ نشان داد (مساح بوانی و مرید، ۴۰:۱۳۸۴). گوش و ماجامدار[۱] (۲۰۰۶) برای برآورد بارش، یک الگوی رگرسیون خطیّ را توسعه دادند و در آن با استفاده از خروجی‌های میانگین فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل، میزان بارش را برآوردکردند. این پیش‌بینی براساس سناریوی IS۹۲a، حاکی از احتمال افزایش رویدادهای حدی هیدرولوژیکی در اوریسا[۲] (هند) در آینده بوده است (گوش و ماجامدار، ۴۰۳:۲۰۰۶). حجازی زاده و شیرخانی (۱۳۸۴) جهت بررسی وقوع خشکسالی در دوره کوتاه مدت و وقوع آن در منطقه خراسان از دو روش گیبس و ماهر[۳] و زنجیره مارکف[۴] استفاده نمودند. سپس با محاسبه‌ی فراوانی دوره های خشک، احتمال وقوع این دوره ها و سرانجام دوره بازگشت آنها را مشخص‌کردند (حجازی زاده و شیرخانی، ۱۳:۱۳۸۴). در تحقیق دیگری، لشنی زند و تلوری (۱۳۸۳) با استفاده از شاخص استاندارد بارش و با توجه به امتیازاتی که این شاخص در تحلیل منطقه‌ای و ایجاد ارتباط زمانی بین رخدادهای خشکسالی در نواحی مختلف یک پهنه دارد، نقشه‌های پهنه‌بندی ماهانه‌ی خشکسالی برای یک دوره‌ی سی‌ساله را تهیه کردند. سپس با استفاده از داده‌های حاصل از مسّاحی نقشه های ماهانه خشکسالی، سری های زمانی میانگین ماهانه شدّت خشکسالی را برای هر حوضه به دست آوردند. سپس، به کمک الگوهای سری زمانی و انتخاب مناسب ترین الگو، اقدام به پیش بینی ماهانه شاخص شدّت متوسط خشکسالی برای شش حوضه‌ی واقع در غرب و شمال غرب کشور نمودند و در پایان با استفاده از الگوهای به دست آمده، خشکسالی‌های اقلیمی ۴۸ ماه آینده را برای هر حوضه و کل منطقه پیش‌بینی کردند (لشنی زند و تلوری، ۱۲۳۰۸:۱۳۸۳). رضیبی و همکاران (۱۳۸۲) نیز شدّت، تداوم و فراوانی خشکسالی هواشناسی را به صورت موردی در سطح استان سیستان و بلوچستان از طریق ترکیب تئوری RUN

---

۱. Ghosh & Mujumdar
۲. Orissa
۳. Gibbs & Maher
۴. Markov Chain

و زنجیره مارکف با ساخت ماتریس احتمال انتقال و ماتریس ایستا مورد بررسی قرار دادند و وضعیّت بلندمدت منطقه را از نظر تدوام و طول مدت خشکسالی ها طیّ ده سال آینده، پیش بینی نمودند (رضیی و همکارن، ۲۹۲:۱۳۸۲).

در تحقیق حاضر، جهت پایش و ارزشیابی خشکسالی کشور طیّ سی سال آینده (۳۹-۲۰۱۰)، از خروجی الگوهای GCM استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا این داده ها با استفاده از الگوی LARS-WG که یکی از روش‌های آماری ریزگردانی است، کوچک مقیاس شده اند. سپس، به کمک داده‌های بارش شبیه سازی شده، وضعیّت خشکسالی به کمک دو شاخص دهک (DI) و استاندارد بارش (SPI) برای کشور، طیّ دوره مورد مطالعه، بررسی شده است.

مواد و روش ها

الف) معرّفی الگو

یکی از معروف‌ترین الگوهای مولّد داده‌های تصادفی وضع هوا الگوی LARS-WG است که برای تولید داده‌های روزانه‌ی بارش، تابش، بیشینه وکمینه دمای یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (زمنف و بارو[1]، ۳۰:۲۰۰۲). الگوهای مصنوعی مولّد پارامترهای هواشناسی[2]، الگوهای عددی هستند که خروجی الگوهای گردش عمومی جو را با استفاده از روش های آماری به نحوی ریزگردانی می کنند که به مقدار واقعی در مقیاس ایستگاهی بسیار شباهت دارد. اولین نسخه LARS-WG در سال ۱۹۹۰ در بوداپست، به عنوان روشی آماری جهت ریزگردانی داده ها ابداع شد و اساس و تئوری آن توسط راسکو[3] (۱۹۹۱) ارایه گردید. در این الگو از توزیع‌های آماری پیچیده ای استفاده شده است و مبنای الگوسازی در آن طول دوره‌های تر و خشک، بارش روزانه و سری های تابش توزیع نیمه تجربی قرارگرفته است (راسکو و همکاران، ۲۷:۱۹۹۱).

در این الگو برآورد دما به کمک سری‌های فوریه انجام می‌شود و دمای بیشینه و کمینه‌ی روزانه به صورت فرایندهایی تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که به وضعیّت تر یا خشک روز مورد نظر وابسته‌اند، الگوسازی می‌شود. سری فوریه مرتبه‌ی سوم برای شبیه سازی میانگین و انحراف معیار درجه حرارت‌های

۱. Barrow
۲. Weather Generator
۳. Rasco

فصلی به کار می رود. مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیدبانی شده حاصل می‌شوند، در تحلیل خود هم‌بستگی زمانی داده‌های بیشینه و کمینه مورد استفاده قرار می گیرند. در واقع الگوی LARS-WG از سه بخش اصلی شامل کالیبراسیون الگو، ارزشیابی الگو و ایجاد داده‌های هواشناسی تشکیل شده است (بابائیان و نجفی نیک، ۴۷:۱۳۸۴).

ب) داده‌ها و منطقه‌ی مورد مطالعه

پس از بررسی و کنترل کیفی داده ها، از میان ایستگاه های سینوپتیک کشور تعداد ۴۷ ایستگاه که در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶ ، دارای آمار بدون نقص بودند، انتخاب شدند. در این ارتباط، نرمال بودن داده ها بررسی شد و هم‌گنی آنها با استفاده از آزمون Run Test مورد ارزشیابی قرار گرفت. نتایج حاصل روی ۴۷ ایستگاه مورد نظر قابل قبول بود و تصادفی بودن آنها در سطح اطمینان ۹۵٪ پذیرفته شد. در این تحقیق، از داده های دیدبانی شده ایستگاه های مورد مطالعه و داده های سناریوی A۱ الگوی گردش عمومی جو ECHO-G استفاده شده است که داده های اخیر با استفاده از الگوی LARS-WG در مقیاس ایستگاهی ریزگردانی شده‌اند. برای این منظور الگو چندین بار اجرا شد و مقادیر متوسط سری های تولید شده مبنای داوری قرار گرفتند.

به طور کلّی، ارایه‌ی پیش بینی‌های بلندمدّت به کمک الگوهای اقلیمی براساس مجموعه‌ای از فرضیّات انجام می‌شود، که این فرضیّات در قالب سناریوهایی بیان می‌شود. سناریوهای اقلیمی نتایج قابل قبول و سازگاری با اقلیم آتی هستند، که براساس اثرات حیات انسان بر اقلیم بنا شده‌اند. تمام سناریوهای اقلیمی با الگوهایGCM شبیه سازی شده‌اند. این پیش بینی های اقلیمی برمبنای تغییر انتشار و غلظت گازهای گلخانه ای و سایر آلاینده های جوّی (نظیر دی اکسیدسولفور و ...) و با توجه به فرضیّات اجتماعی- اقتصادی و گسترش و توسعه‌ی فن‌آوری در آینده بنا شده اند. در این ارتباط هیأت بین الدول تغییر اقلیم[۱] با همکاری سازمان هواشناسی جهانی[۲] و برنامه‌ی محیط زیست سازمان ملل متحد[۳] با هدف ارزشیابی، شناخت و مطالعه‌ی جنبه‌های علمی، فنی، اقتصادی ـ اجتماعی و مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم توسط انسان، سناریوهای مختلفی را ارایه نموده است. این سناریوها شامل برآورد جمعیت، تولید ناخالص ملی، میزان مصرف انرژی (به تفکیک بخش های

۱. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
۲. World Meteorological Organization (UNEP)
۳. United Nations Environment Programme (UNEP)

تجاری، صنعت، حمل و نقل و مسکونی)، تولید انرژی، میزان تولید و مصرف سوخت های ثانوی، میزان تولید انرژی از سوخت‌های مایع، جامد، گاز هیدروژنی، هسته ای، خورشیدی، بیوماس، مقدار انتشار دی اکسیدکربن، منواکسیدکربن، اکسیدنیترو، اکسیدهای نیتروژن و متان از طریق احتراق، انتشار متان از معادن و بسیاری منابع انتشار گازهای گلخانه ای برای مناطق مختلف کره زمین است. با این توضیح، در مطالعه‌ی حاضر فرضیّات مورد نظر جهت اجرای الگوی LARS-WG براساس سناریوی A۱ در نظر گرفته شده است. در این سناریو مقادیر انتشار گازها در جو تا سال ۲۱۰۰ مطابق جدول ۱ فرض شده است.

جدول ۱. مقادیر گازهای منتشر شده در سناریوی انتشار پایه A۱

Year	Foss CO2 (Gt C)	Defo CO2 (Gt C)	CH4 (Tg)	N2O (Tg N)	SO2,1 (Tg S)	SO2,2 (Tg S)	SO2,3 (Tg S)
1990	6.167	1.083	322.213	6.292	0.000	0.000	0.000
2000	6.790	1.581	346.821	6.885	-8.485	1.762	1.434
2010	9.705	1.550	416.774	7.332	-14.513	21.617	8.616
2020	12.233	1.613	483.767	7.727	-18.517	33.686	13.945
2030	14.189	0.704	547.212	7.485	-21.483	24.278	16.939
2040	15.192	0.255	530.648	7.144	-23.569	5.030	24.709
2050	16.194	-0.194	514.085	6.803	-25.654	-14.219	32.478
2060	15.894	-0.271	463.562	6.346	-26.344	-14.594	20.446
2070	15.594	-0.349	413.039	5.889	-26.784	-14.570	14.559
2080	14.988	-0.431	370.346	5.502	-27.647	-15.276	1.948
2090	14.076	-0.520	335.482	5.185	-28.181	-15.516	1.049
2100	13.164	-0.608	300.618	4.869	-28.716	-15.756	0.150

پ) صحّت سنجی الگو

برای دست‌یابی به بهترین نتایج در هر الگوی، کالیبراسیون صحیح و صحّت سنجی اطلاعات از اهمیت بسیاری برخوردار است. از این رو، با استفاده از ۳۰ سال داده دیدبانی شده ۴۷ ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و مقایسه آن با داده های تولید شده الگو در این دوره، کالیبراسیون الگو LARS-WG صورت گرفت. برای این منظور، یک سناریوی حالت پایه تهیه و این الگو برای دوره نرمال اجرا شد. جهت مقایسه خروجی‌های الگو با داده‌های دیدبانی شده، از آزمون‌های آماری مختلف نظیر t-student، t زوجی و نیز نمودارهای مقایسه‌ای استفاده گردید. همچنین ضرایب هم‌بستگی، میانگین ماهانه، انحراف معیار، بایاس و

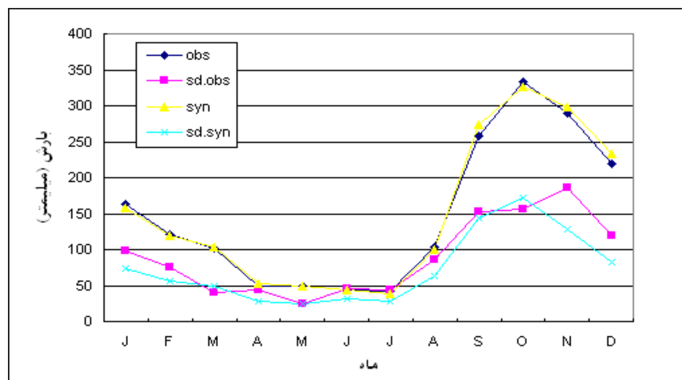
میانگین خطای مطلق در سری داده های دیدبانی شده و نرمال نیز برای تمامی ایستگاه های مورد نظر محاسبه شد. به عنوان مثال برخی از نتایج تحلیل های آماری برای دو ایستگاه بندرانزلی و بیرجند در جدول ۲ نشان داده شده است. با تحلیل نتایج به دست آمده از آزمون t-student برای ۴۷ ایستگاه منتخب، ملاحظه شد که بین مقادیر الگوسازی شده بارش و مقادیر واقعی آن اختلاف معنی داری با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد، به عبارت دیگر خطای موجود تصادفی است. همچنین مقادیر هم‌بستگی پیرسن[۱] بین داده های الگوسازی شده بارش و داده های واقعی در سطح معنی دار ۰/۰۱ قابل قبول است.

در شکل های ۱ و ۲، مقادیر بارش ماهانه حاصل از الگو براساس متوسط چندین سری بارش در کنار مقادیر دیدبانی بارش ماهانه و همچنین انحراف معیار آنها طیّ دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ به عنوان نمونه برای دو ایستگاه انزلی و بیرجند ارایه شده است. با توجه به این شکل ها ملاحظه می‌شود که الگو به خوبی توانسته تغییرات بارش را طیّ ماه‌های مختلف شبیه سازی کند و اختلاف مشاهده شده در برخی از ماه ها با توجه به آزمون t-student با خطای بحرانی ۰/۰۵ معنی دار نیست. به عبارت دیگر، الگو LARS-WG توانایی الگوسازی اقلیم دوره گذشته ایستگاه های مورد مطالعه را براساس یک سناریوی حالت پایه داراست.

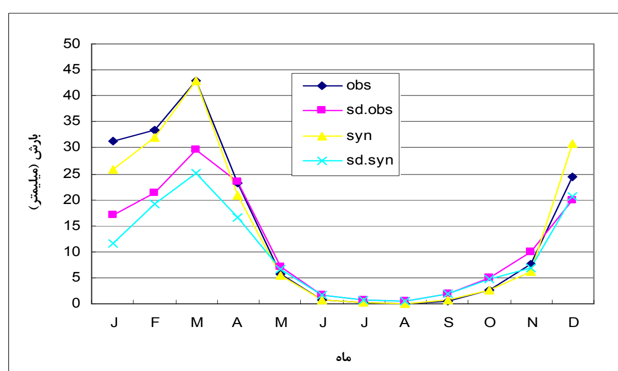
جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر الگوسازی الگو LARS-WG با مقادیر واقعی در دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶

مقادیر / ایستگاه	t-TEST	BIAS	MAE	Correlation
بندرانزلی	۰/۹۳	۱/۳	۰/۹۴	۰/۹۹۸
بیرجند	۰/۸۸	۰/۳۹۶	۰/۱۸	۰/۹۹۲

۱. Pearson's Correlation



شکل ۱. مقایسه‌ی مقادیر بارش الگوسازی شده و دیدبانی شده برای ایستگاه بندر انزلی (۲۰۰۵-۱۹۷۶)



شکل ۲. مقایسه‌ی مقادیر بارش الگوسازی شده و دیدبانی شده برای ایستگاه بیرجند (۲۰۰۵-۱۹۷۶)

پس از اطمینان از توان‌مندی الگو برای شبیه سازی بارش کشور طیّ سال های آینده، سناریوهای تغییر اقلیم روی پانزده شبکه‌ی محاسباتی، برمبنای مقایسه‌ی خروجی‌های الگو ECHO-G در دوره‌های ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و ۲۰۳۹-۲۰۱۰ تدوین گردید و با استفاده از رفتار اقلیمی دوره گذشته ایستگاه‌های مورد مطالعه و چندین بار اجرای الگو، مقادیر بارش روزانه‌ی این ایستگاه ها طیّ دوره ۳۹-۲۰۱۰ شبیه سازی شدند و درنهایت به منظور پایش و ارزشیابی خشکسالی در این دوره، مقادیر متوسط سری داده های بارش تولید شده مورد استفاده قرار گرفت.

ت) ارزشیابی خشکسالی با استفاده از شاخص دهک

شاخص دهک به عنوان یک شاخص هواشناسی جهت پایش خشکسالی توسط سیستم مراقبت خشکسالی استرالیا[1] انتخاب شده است، زیرا این روش دارای محاسبات نسبتاً ساده‌ای است و به تعداد داده‌های کمتری نیاز دارد (هایز[2]، ۲۰۰۲:۱۰)، اما اشکال این روش آن است که برای محاسبه‌ی دهک ها به آمار اقلیمی بلندمدت نیاز است.

در این تحقیق به منظور پایش خشکسالی در کشور طیّ دوره ۳۹-۲۰۱۰ به روش دهک، ابتدا به کمک نرم افزار SPSS شاخص دهک سالانه برای هر یک از ایستگاه های مورد مطالعه، طیّ این دوره محاسبه و سپس در محیط Arc view نقشه های پهنه بندی آن رسم شده است.

ث) ارزشیابی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI

شاخص SPI از دیگر شاخص‌هایی است که در تحلیل منطقه ای خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص استاندارد بوده و می توان از آن در مطالعات منطقه ای و ایجاد ارتباط زمانی بین رخدادهای خشکسالی در نواحی مختلف استفاده کرد. شاخص SPI در سال ۱۹۹۳ توسط مک کی و همکاران با توجه به بررسی اثرات متفاوت کمبود بارش روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب‌های سطحی، کلاهک برفی و جریان آبراهه‌ها در ایالت کلرادو ارایه شد (مک کی[3] و همکاران، ۱۹۹۳:۱۷۹).

استفاده از این شاخص دارای امتیازاتی است که عبارت‌اند از: سادگی این روش (شاخص SPI فقط بر پایه پارامتر بارش بنا شده است)، قابلیّت بالای این شاخص به عبارتی چند بعدی بودن آن (به این معنی که در هر مقیاس زمانی قابل محاسبه است)، این شاخص از توزیع نرمال پیروی می کند، درنتیجه می‌توان وقایع خشکسالی شدید و فراگیر را برای هر مکان و در هر مقیاس زمانی طبقه بندی کرد (هایز و همکاران، ۱۹۹۹:۲۳۲).

با توجه به طبقه بندی شدّت خشکسالی براساس شاخص SPI، مشاهده می‌شود که مقادیر منفی SPI معرّف بارش کمتر از نرمال (شرایط آغاز خشکسالی) و مقادیر مثبت آن معرف بارش بیشتر از نرمال (شرایط پایان خشکسالی) است (احمدیان طبسی و همکاران، ۱۳۸۵:۱۹).

---

۱. Australian Drought Watch System
۲. Hayes
۳. McKee

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از داده‌های سناریوی A1 الگوی گردش عمومی جو که توسط الگوی LARS-WG در مقیاس ایستگاهی ریزگردانی شده است، داده های بارش برای ۴۷ ایستگاه انتخابی در سطح کشور، طیّ سی سال آینده (دوره ۲۰۳۹–۲۰۱۰) شبیه سازی شد. سپس به منظور پایش و ارزشیابی خشکسالی طیّ این دوره، به کمک این داده ها شاخص دهک و SPI در مقیاس سالانه برای ایستگاه های مورد نظر محاسبه و نقشه های پهنه‌بندی آن تهیه گردید. لازم به ذکر است که پهنه بندی شاخص خشکسالی به روش IDW[۱] و در محیط Arc view انجام شده است.

مطالعه‌ی وضعیّت خشکسالی طیّ سی سال آینده در ایران نشان داد که دو شاخص دهک و SPI به خوبی در این منطقه با یکدیگر تطابق داشته و یکدیگر را تأیید می کنند، اما باید توجه داشت که در پهنه بندی انجام شده توسط این دو شاخص (شکل های ۳ تا ۸) محدوده‌ی طبقه بندی این شاخص ها متفاوت بوده، اما هر دوی آنها جهت پیش آگاهی وقوع خشکسالی در منطقه‌ی مورد مطالعه با یکدیگر هم‌خوانی دارند. بررسی وضعیّت خشکسالی ایران طیّ دوره مورد مطالعه براساس این دو شاخص، نشان داد که در بیشتر سال های مورد مطالعه شرایط خشکسالی در بسیاری از بخش های کشور وجود خواهد داشت، به گونه‌ای که در سال های ۲۰۱۱، ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۴، ۲۰۳۵ و ۲۰۳۹ منطقه با وضعیّت خشکسالی شدیدی روبرو خواهد بود.

در شکل شماره ۳ وضعیّت خشکسالی کشور طیّ سال ۲۰۱۱ با استفاده از شاخص دهک و SPI نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در نواحی شمال شرق و شمال غرب کشور، وضعیّت خشکسالی شدید حاکم خواهد بود، به گونه‌ای که استان های خراسان رضوی، سمنان، زنجان و همدان دارای خشکسالی بسیار شدید و استان هایی نظیر خراسان شمالی، شاهرود، گرگان، برخی از نواحی شمالی، شرقی و مرکزی نظیر گیلان، زاهدان و کرمان، همچنین استان های آذربایجان شرقی و غربی، کردستان و کرمانشاه دارای خشکسالی شدید خواهند بود.

در شکل شماره ۴ وضعیّت خشکسالی کشور طیّ سال ۲۰۲۵ با استفاده از دو شاخص مورد مطالعه، نشان داده شده است. براساس این شکل، به جز قسمت هایی از شمال شرق، شمال غرب، جنوب شرق کشور و نیز

۱. Inverse Distance Weighted

بخش‌هایی از استان های سمنان، یزد و مازندران در بیشتر نقاط کشور شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید برقرار خواهد بود.

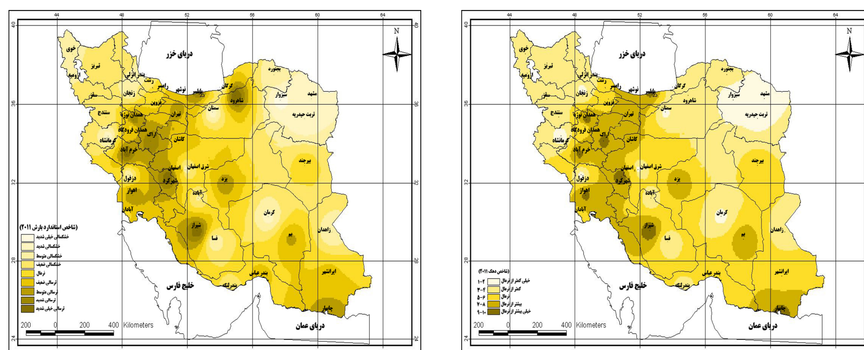
شکل شماره ۵، وضعیّت خشکسالی کشور را طیّ سال ۲۰۳۲ با استفاده از دو شاخص مذکور نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در استان‌های خراسان شمالی، شاهرود، یزد، آذربایجان شرقی و غربی و بخش‌های جنوبی استان سیستان و بلوچستان شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید حاکم خواهد بود.

در شکل شماره ۶ ملاحظه می‌شود که طیّ سال ۲۰۳۴ بخش هایی از استان های تهران، قزوین، سمنان، کاشان و نیز قسمت های مرکزی کشور نظیر یزد، کرمان، بخش هایی از جنوب مانند استان فارس و نیز برخی از نواحی غربی نظیر استان کردستان تحت تأثیر خشکسالی قرار خواهند داشت.

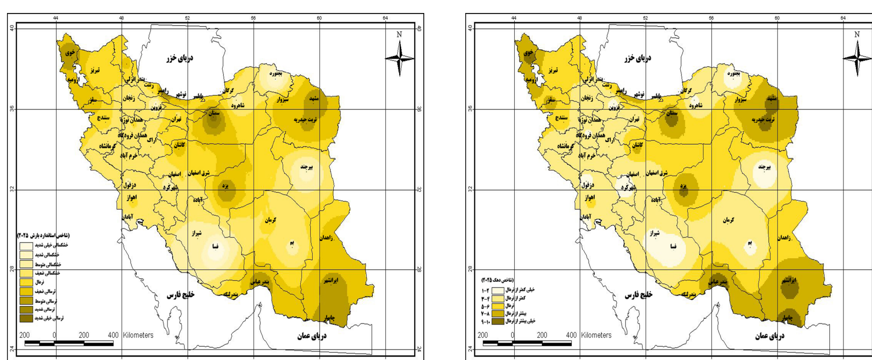
با توجه به شکل شماره ۷ مشاهده می شود که طیّ سال ۲۰۳۵ خشکسالی بخش های وسیع تری از کشور را تحت تأثیر قرار خواهد داد، به گونه‌ای که در نواحی شرقی و شمال شرقی، نواحی غربی، مرکزی و بخش‌هایی از جنوب کشور شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید حاکم خواهد بود. در بین این نواحی، استان های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، کرمان، مرکزی، خوزستان، کاشان و کردستان دارای شرایط بحرانی تری خواهند بود.

طیّ دوره مورد مطالعه، شدیدترین وضعیّت خشکسالی مربوط به سال ۲۰۳۹ خواهد بود که در این سال بیشتر مناطق کشور، به جز بخش‌های کوچکی از غرب، شمال غرب، جنوب غرب و جنوب (نظیر بخش های از استان های آذربایجان غربی، کرمانشاه، خوزستان و هرمزگان) دارای بارش‌های کمتر از نرمال خواهند بود که معرّف شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید است (شکل ۸).

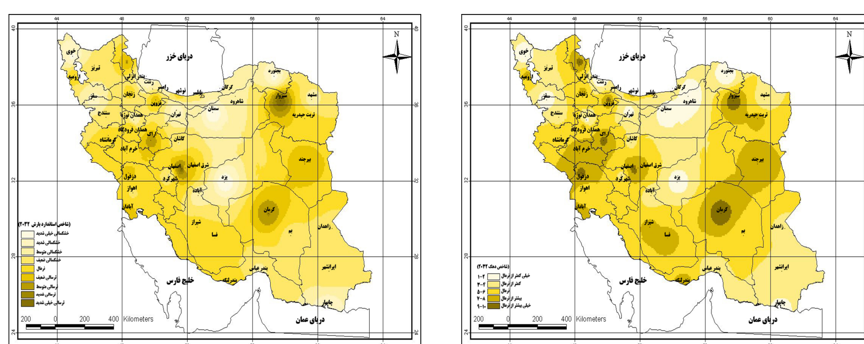
به طورکلّی این مطالعه نشان می دهد که طیّ سی سال آینده شرایط خشکسالی در کشور رو به افزایش است که این مسأله وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید می‌کند. با توجه به صحّت سنجی انجام شده در این تحقیق، داده‌های بارش شبیه سازی شده که اساس کار ارزشیابی خشکسالی به دو روش دهک و SPI هستند، با دقّت بیش از ۹۰٪ قابل قبول‌اند، لذا به نظر می رسد که پایش و ارزشیابی انجام شده درخصوص وقوع خشکسالی در کشور طیّ دوره‌ی مورد مطالعه نیز با این احتمال قابل بحث و بررسی باشد.



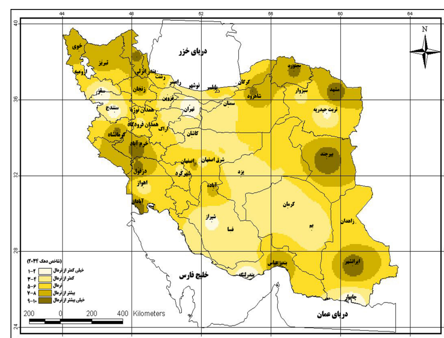
شکل۳. وضعیّت خشکسالی ایران براساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طیّ سال ۲۰۱۱

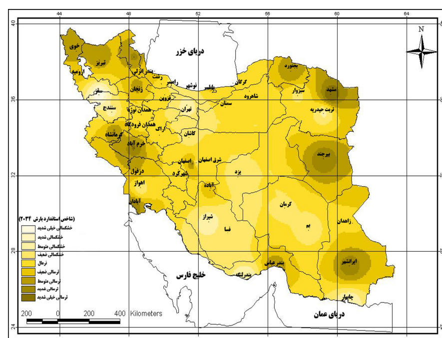


شکل٤. وضعیّت خشکسالی ایران براساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طیّ سال ۲۰۲۵

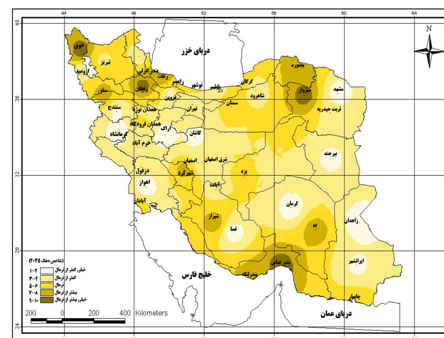


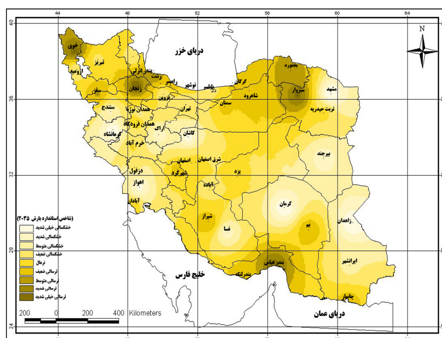
شکل۵. وضعیّت خشکسالی ایران براساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طیّ سال ۲۰۳۲



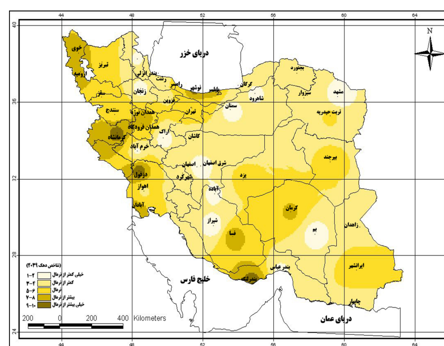


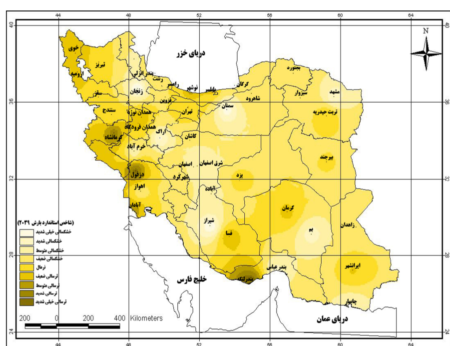
شکل۶. وضعیّت خشکسالی ایران براساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طیّ سال ۲۰۳۴





شکل۷. وضعیّت خشکسالی ایران براساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طیّ سال ۲۰۳۵





شکل۸. وضعیّت خشکسالی ایران براساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طیّ سال ۲۰۳۹

پیوست:

- **GCM (General Circulation Model):**

در یک الگوی گردش عمومی (که الگو اقلیم جهانی نیز شناخته و هر دو این ها به اختصار GCM نامیده می‌شوند) همان معادلات حرکت به کار رفته در الگوهای پیش بینی عددی وضع هوا (NWP) به کار می روند، اما هدف آن شبیه سازی عددی تغییرات ایجاد شده در اقلیم به عنوان نتیجه ای از تغییرات کند در برخی از شرایط مرزی (نظیر ثابت خورشیدی) یا پارامترهای فیزیکی (نظیر غلظت گازهای گلخانه ای) است. الگوهای پیش بینی عددی وضع هوا (NWP) برای پیش بینی آتی وضعیت آب و هوایی در کوتاه مدت (۱ تا ۳ روز) و میان مدت (۴ تا ۱۰ روز) به کار می رود، اما GCMها برای زمان طولانی تری (سال های متوالی) اجرا می شوند تا بتوانند درباره چگونگی شرایط اقلیم در دوره های آماری اطلاعات کافی را بیاموزند.

- **LARS-WG:**

یک الگو شبیه سازی سری های زمانی از داده های هواشناسی روزانه برای یک مکان مشخص، با توانایی های زیر است:

۱. تولید سری های زمانی بلندمدت مناسب برای ارزشیابی خطرات کشاورزی و هیدرولوژی؛
۲. تولید مقادیر متوسط داده های هواشناسی شبیه سازی شده برای مناطق فاقد ایستگاه؛
۳. این الگو یک ابزار ساده محاسباتی برای تولید داده های روزانه هواشناسی در یک مکان مشخص در آینده براساس سناریوهای اقلیمی به منظور ارزشیابی اثرات مختلف تغییر اقلیم است.

- **HadCM:**

یکی از انواع الگوهای پیش بینی اقلیمی است که اطلاعات مربوط به چگونگی وضع آب و هوا را به صورت بلندمدت ارایه می دهد. این الگو در مرکز Met Office در انگلستان اجرا می شود و نتایج آن به طور مرتب در سایت این مرکز به آدرس http://www.metoffice.gov.uk در دسترس است.

منابع و مآخذ:

۱. احمدیان طبسی، جواد- همکاران، (۱۳۸۵)، *پتانسیل ها و محدودیّت های اقلیمی شهرستان های خراسان رضوی*، پژوهشکده اقلیم شناسی، گزارش پروژه.
۲. بابائیان، ایمان - نجفی نیک، زهرا، (۱۳۸۴)، *مطالعه مقدماتی و ارزشیابی الگو های Weather Generator مطالعه موردی: ارزیابی الگو LARS-WG بر روی ایستگاه های منتخب خراسان*، پژوهشکده اقلیم شناسی، گزارش پروژه.
۳. حجازی زاده، زهرا - شیرخانی، علیرضا، (۱۳۸۴)، *تحلیل و پیش بینی خشکسالی و دوره های خشک کوتاه مدت در استان خراسان*، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۷.
٤. رضیبی، طیب - شکوهی، علیرضا - ثقفیان، بهرام، (۱۳۸۲)، *پیش بینی شدّت، تداوم و فراوانی خشکسالی با استفاده از روش های احتمالاتی و سری های زمانی- مطالعه موردی استان سیستان و بلوچستان*، مجله بیابان، جلد ۸ شماره ۲.

۵. شاه کرمی، نازنین، مساح بوانی، علیرضا، (۱۳۸۵)، *تحلیل عدم قطعیت الگو های جفت شده اقیانوس-اتمسفر-گردش عمومی جو بر سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در حوضه زاینده رود*، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب.

٦. صمدی نقاب، سینا، (۱۳۸۵)، *پیش بینی خشکسالی با روش ریزگردانی خروجی الگوهای GCM*، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره هشتم.

۷. لشنی زند، مهران ـ تلوری، عبدالرسول، (۱۳۸۳)، *بررسی خشکسالی اقلیمی و امکان پیش بینی آن در شش حوضه واقع در غرب و شمال غرب ایران*، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۲.

۸. مساح بوانی، علیرضا ـ مرید، سعید، (۱۳۸۴)، *اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و تولید محصولات کشاورزی*، مجله تحقیقات منابع آب، سال اول.

۹. Babaeian, I., Kwon, W.T. and Im, E.S., (۲۰۰۴), *Application of Weather Generator Technique for Climate Change Assessment over Korea*, Korea Meteorological Research Institute, Climate Research Lab., ۹۸ pp.

۱۰. Dubrovsky, M., (۱۹۹۶), Met & Roll, *The Stochastic Generator of Daily Weather Series for the Crop Growth Model*, Meteorological Bulletin ۴۹, ۹۷–۱۰۵.

۱۱. Dubrovsky, M., (۱۹۹۶*), Validation of the Stochastic Weather Generator Met & ROLL*, Meteorogickeo Zpravy, Vo. l۴۹, pp. ۱۲q–۱۳۸۰.

۱۲. Ghosh, S., Mujumdar, P.P., (۲۰۰۶), *Future Rainfall Scenario over Orissa with GCM Projections by Statistical Downscaling*, Current Science, Vol. ۹۰, No. ۳.

۱۳. Hayes, M.J., Svobada, M.D., Wilhite, D.A. and Vanyarkho, O.V., (۱۹۹۹), *Monitoring ۱۹۹۶ Drought Using the Standardized Precipitation Index*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. ۸۰.

۱٤. Hayes, Michael, J., (۲۰۰۲), *When Is Drought*? Drought Indices, Climate Impacts Specialist, National Drought Mitigation Center, (http://www. drought. unl.edu/ whatis/indices.htm).

۱٥. Johnson, G.L., Hanson, C.L., Hardegree, S.P. and Ballard, E.B., (۱۹۹۶), *Stochastic Weather Simulation: Overview and Analysis of two Commonly Used Models, J.* Applied Meteorology ۳۵, ۱۸۷۸–۱۸۹۶.

۱٦. McKee, T.B., N.J., Doesken and J., Kliest, (۱۹۹۳), *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*, In Proceedings of the ۸th Conference of Applied Climatology, ۱۷–۲۲ January, Anaheim, CA. American Meterological Society, Boston, MA., ۱۷۹–۱۸۴.

۱۷. Mc Kague, K., et al. (۲۰۰۳), Clim. *Gen-A ZGnvenient Weather Genera Tion Tool for Canadian Climate Stations*, Proceeding of CCAE/SCGR ۲۰۰۳ Meeting, Montreal, Canada.

۱۸. Rasco, P., Szeidl, L. and Semenov, M.A., (۱۹۹۱), *A Serial Approach to local Stochastic Models, J.* Ecological Modeling, ۵۷, ۲۷–۴۱.

۱۹. Semenov, M.A. and Brooks R.J., (۱۹۹۹), *Spatial Interpolation of the LARS-WG Stochastic Weather Generator in Great Britain*, Climate Research, ۱۱: ۱۳۷–۱۴۸.

۲۰. Semenov, M.A. and Barrow, E.M., (۲۰۰۲), *LARS-WG a Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies,* User's Manual, Version ۳,۰.

۲۱. Thompson, C.S. and Mullan, A.B, (۱۹۹۵*), Weather Generators*, NIWA Internal Report, ۱۱۵–۱۲۰.

۲۲. Wilks, D.S., (۱۹۹۲), *Adapting Stochastic Weather Generation Algorithms for Climate Change Studies*, Climate Change, ۲۲, ۶۷–۸۴.

۲۳. Wilks, D.S. and Wilby, R.L., (۱۹۹۹*), The Weather Generation Game: A Review of Stochastic Weather Models,* Progress in Physical Geography, ۲۳, ۳۲۹–۳۵۷.